

Título em Português: Modelagem matemática do movimento de forrageio do *Physarum polycephalum*

Título em Inglês: Mathematical modeling of the foraging movement of *Physarum polycephalum*

Autor: Bruno Rafael Florentino

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Jose Fernando Fontanari

Área de Pesquisa / SubÁrea: Física Geral

Agência Financiadora: USP - Programa Unificado de Bolsas

Modelagem matemática do movimento de forrageio do *Physarum polycephalum*

Bruno Rafael Florentino

José Fernando Fontanari

Universidade de São Paulo

brunorf1204@usp.br

Objetivos

O protozoário *Physarum polycephalum* exibe a curiosa característica de conseguir navegar em ambientes complexos com o objetivo de encontrar comida. Um experimento clássico realizado com esse organismo mostrou que o mesmo é capaz de se orientar dentro de labirintos. Nesse contexto, esse trabalho tinha como objetivo principal propor um modelo computacional baseado em autômatos celulares para simular o forrageio dessa espécie de protozoário. Ademais, é necessário destacar que esse modelo deveria conter os elementos de memória espacial para o desvio de regiões que já foram visitadas com o objetivo de simular sua navegação.

Métodos e Procedimentos

Na literatura já existe um modelo computacional para esse protozoário (Gunji et al, 2010), porém o mesmo apenas descreve o comportamento da agregação de protozoários quando já estão sobre as fontes de alimento. Para simular o forrageio, a busca por recursos alimentares, foi necessário adicionar dois outros elementos a esse modelo, a quimiotaxia e a memória espacial.

A primeira adição, quimiotaxia, se refere ao movimento em resposta a algum agente químico. No contexto estudado, as fontes de alimentos possuem um odor atrativo capaz de orientar a agregação de protozoário pelo espaço.

A outra adição, memória espacial, se refere a hormônios liberados pelo próprio organismo que é capaz de marcar regiões previamente

visitadas, assim podendo evitar as mesmas futuramente.

Por fim, o modelo final foi comparado com os experimentos in vivo de Reid et al (2012).

Resultados

Como resultado foi construído um modelo de *Physarum polycephalum* capaz de navegar pelo espaço a partir de quimiotaxia e memória espacial externa. Em seguida, ao simular em condições similares aos do experimento de Reid et al (2012), uma armadilha em formato de U, foi constatado que o protozoário do modelo proposto é capaz de fugir da mesma e encontrar a fonte de comida, similar ao experimento real.

Na figura 1 é possível visualizar quatro instantes de tempo das simulações. Primeiramente, vemos a condição inicial com a agregação de protozoários em amarelo, a armadilha em ciano e a fonte de comida em preto. Ademais, toda vez que se movimenta o mesmo excreta um hormônio nas regiões em que se move, de forma a marca-las. Também temos que a partir do início da simulação a fonte de comida emite um odor que a agregação consegue perceber e o protozoário passa a se mover para as regiões de maior concentração do odor.

Consequentemente, passa a se movimentar para dentro da armadilha, dado que o fundo da armadilha está mais próximo da fonte e assim nessa região a concentração do químico é maior. Nesse momento, a memória espacial tem um papel essencial para a fuga, pois o protozoário marca o todo fundo da armadilha ao ficar preso nela e assim passa a buscar um

outro caminho para a obter seu recurso alimentar que evite regiões já visitadas. Nesse momento, a agregação passa a contornar a armadilha em busca de uma saída, se movendo por um intervalo contra a direção de maior concentração do odor. Uma vez fora da armadilha vemos que o organismo volta a se movimentar na direção da fonte do químico até encontrá-lo.

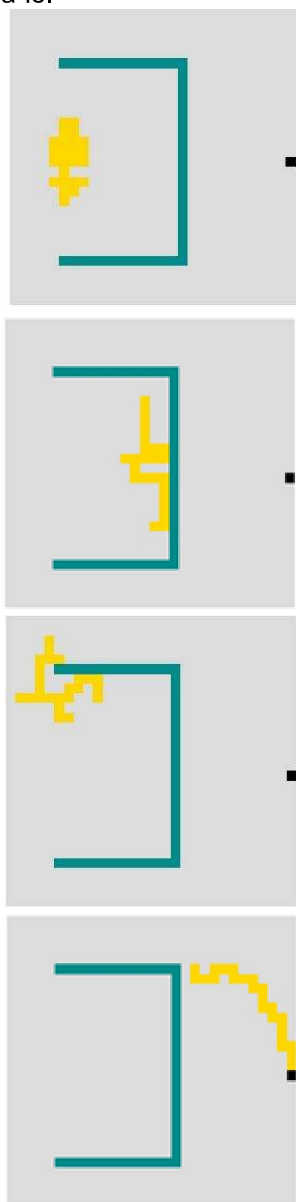


Figura 1: Quatro instantes de tempo das simulações, com o protozoário representado em amarelo, a armadilha em ciano e a comida em preto. Imagem elaborada pelo autor.

Adiante, algumas das análises realizadas no artigo acima também foram implementadas no

modelo proposto neste trabalho. A principal é a reação da resposta de fuga da armadilha na presença de ruído ao sistema de memória, em ambos os modelos vemos que a capacidade de fugir é danificada, causando um aumento no tempo de fuga e do tempo explorando áreas já visitadas. De forma, que talvez os dados experimentais possam ser explicados pelo modelo computacional.

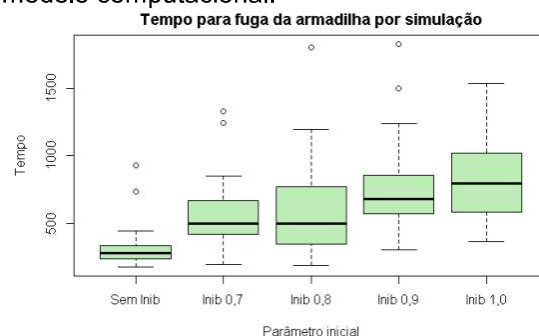


Figura 2: Tempo de fuga da armadilha, sendo “Sem Inib” o modelo sem ruído e “Inib A” para o modelo com ruído igual a A, com o ruído medido entre 0 e 1. Imagem elaborada pelo autor.

Conclusões

Ao implementar um modelo computacional com elementos de quimiotaxia e memória espacial vemos que ele é capaz de gerar resultados semelhantes aqueles gerados pelo protozoário. Ou seja, uma abordagem com quimiotaxia é uma explicação para o forrageio do protozoário e a memória para como o mesmo é capaz de navegar mesmo em ambientes complexos. Portanto, há mais evidências que sugerem que simulações computacionais podem ser usadas para estudar comportamentos de organismos vivos complexos.

Referências Bibliográficas

- Gunji, Y-P.; Shirakawa, T.; Niizato, T.; Yamachiyo, M.; Tani, I. An adaptive and robust biological network based on the vacant-particle transportation model. *Journal of Theoretical Biology*, v. 272, p. 187-200, 2011.
- Reid et al, Slime mold uses an externalized spatial “memory”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (43), p. 17490–17494, 2012.

Mathematical modeling of the foraging movement of *Physarum polycephalum*

Bruno Rafael Florentino

José Fernando Fontanari

Universidade de São Paulo

brunorf1204@usp.br

Objectives

The protozoan *Physarum polycephalum* exhibits the curious characteristic of being able to navigate complex environments in order to find food. A classic experiment carried out with this organism showed that it is capable of orienting itself within labyrinths. In this context, the main objective of this work was to propose a computational model based on cellular automata to simulate the foraging of this protozoan species. Furthermore, it is necessary to highlight that this model should contain the spatial memory elements for the deviation of regions that have already been visited in order to simulate their navigation.

Materials and Methods

There is already a computational model for this protozoan in the literature (Gunji et al, 2010), but it only describes the behavior of protozoan aggregation when they are already on food sources. To simulate foraging, the search for food resources, it was necessary to add two other elements to this model, chemotaxis and spatial memory.

The first addition, chemotaxis, refers to movement in response to some chemical agent. In the context studied, food sources have an attractive odor capable of guiding protozoan aggregation through space.

The other addition, spatial memory, refers to hormones released by the body itself that are able to mark previously visited regions, thus being able to avoid them in the future.

Finally, the final model was compared with the in vivo experiments by Reid et al (2012).

Results

As a result, a model of *Physarum polycephalum* capable of navigating through space was built using chemotaxis and external spatial memory. Then, when simulating a U-shaped trap under conditions similar to those of the experiment by Reid et al (2012), it was found that the protozoan of the proposed model is able to escape from it and find the source of food, similar to the experiment real.

In figure 1 it is possible to visualize four time instants of the simulations. First, we see the initial condition with the protozoan aggregation in yellow, the trap in cyan and the food source in black. In addition, every time it moves, it excretes a hormone in the regions where it moves, in order to mark them. We also have that from the beginning of the simulation, the food source emits an odor that the aggregation can perceive and the protozoan starts to move to the regions of higher concentration of the odor.

Consequently, it starts to move into the trap, since the bottom of the trap is closer to the source and thus, in this region, the concentration of the chemical is higher. At that moment, spatial memory plays an essential role in the escape, as the protozoan marks the entire bottom of the trap by being trapped in it and thus begins to look for another way to obtain its food resource that avoids regions already visited.

At that moment, the aggregation starts to go around the trap in search of an exit, moving through an interval against the direction of higher odor concentration. Once out of the trap, we see that the organism moves back towards the source of the chemical until it finds it.

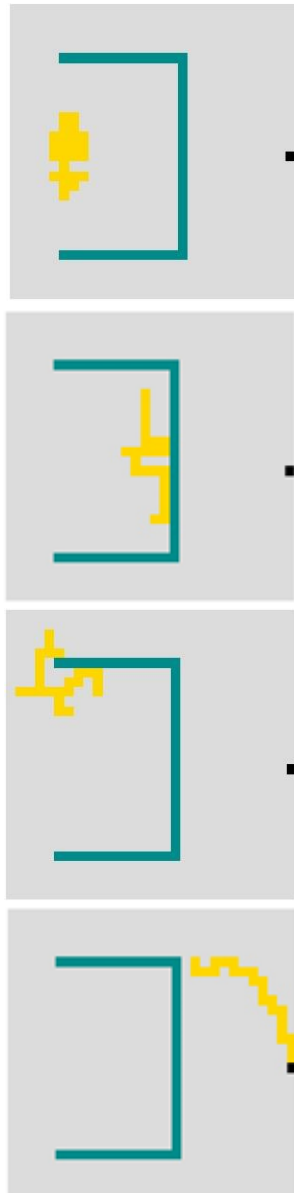


Figure 1: Four time points of the simulations, with the protozoan represented in yellow, the trap in cyan and the food in black. Image created by the author.

Further on, some of the analyzes carried out in the article above were also implemented in the model proposed in this work. The main one is

the reaction of the escape response from the trap in the presence of noise to the memory system, in both models we see that the ability to escape is damaged, causing an increase in escape time and time exploring areas already visited. So that perhaps the experimental data can be explained by the computational model.

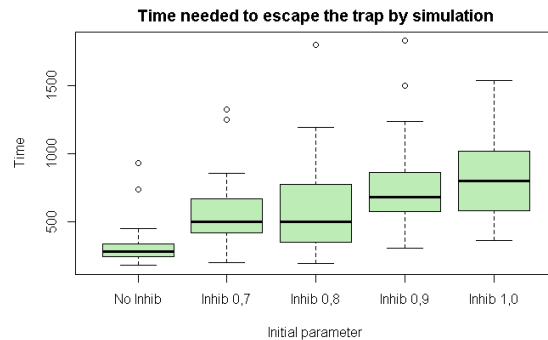


Figure 2: Time required to escape the trap, with "No Inhib" being the model without noise and "Inhib A" for the model with noise equal to A, with noise measured between 0 and 1. Image prepared by the author.

Conclusions

By implementing a computational model with elements of chemotaxis and spatial memory, we see that it is capable of generating results similar to those generated by the protozoan. That is, an approach with chemotaxis is an explanation for the protozoan foraging and the memory of how it is able to navigate even in complex environments. Therefore, there is more evidence to suggest that computer simulations can be used to study the behavior of complex living organisms.

References

- Gunji, Y-P.; Shirakawa, T.; Niizato, T.; Yamachiyo, M.; Tani, I. An adaptive and robust biological network based on the vacant-particle transportation model. *Journal of Theoretical Biology*, v. 272, p. 187-200, 2011.
- Reid et al, Slime mold uses an externalized spatial "memory", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (43), p. 17490–17494, 2012.